

不安定原子核の核構造研究へ向けたコリニアレーザ 一分光装置の性能試験

著者	佐々木 悠輔
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-4
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022926

不安定原子核の核構造研究へ向けた コリニアレーザー分光装置の性能試験

PERFORMANCE TEST OF COLLINEAR LASER SPECTROSCOPY APPARATUS
FOR STRUCTURE STUDY OF UNSTABLE NUCLEI

佐々木悠輔

Yusuke SASAKI

指導教員 松尾由賀利

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

Collinear laser spectroscopy enables us to systematically measure hyperfine structures and isotope shifts of atoms with a high precision and then determine charge radii and electromagnetic moments of their nuclei. We are developing a collinear laser spectroscopy setup towards applying this technique to slow RI beams provided from the SLOWRI facility in RIKEN. We choose Ba^+ ion as the test ion for evaluation of the apparatus, and assembled a 455nm ECLD (External Cavity Laser Diode) which produces a laser light resonant to the D2 line of a Ba^+ ion. The frequency of the ECLD was stabilized by using a feedback control from a high precision wavelength meter. We performed the spectroscopic experiment with the frequency-stabilized ECLD. We succeeded to measure hyperfine structures and isotope shifts for stable Ba isotope ions.

Key Words : *collinear laser spectroscopy, laser, ion*

1. 研究背景

本研究は理化学研究所において RIKEN Collinear Laser Spectroscopy (RICO) プロジェクトと共同で行われた。RICO では不安定核の核構造研究に向け、コリニアレーザー分光装置の開発を進めている。コリニアレーザー分光法はビームと共線軸上にレーザーを照射することで起こる velocity bunching を利用してドップラー幅を大幅に削減することで、原子遷移の高分解能分光を可能とする。そこで得られる原子スペクトルから同位体シフト、超微細構造を決定し、荷電半径や原子核モーメントといった原子核構造に係る量を複雑な原子核理論にほとんど依らず決定できる。この方法は原理的には目的の原子やイオンに対しその原子遷移と共鳴する波長のレーザーが手に入れば適用可能な手法であり、短寿命かつ低収量であり原子核構造を測定することが難しい不安定核イオンに対して有効で、実際にこれまで数多くの不安定同位体 (RI: radioactive isotope) の荷電半径および核モーメントがコリニアレーザー分光法によって測定されている[1]。ただしそのほとんどが CERN の ISOLDE 施設[2]に代表される ISOL 法によって生成された不安定同位体に対する測定である。一方、in-flight 法を利用した理化学研究所の BigRIPS 施設[3]では ISOL 法では得るのが困難な元

素の RI を得ることができる。BigRIPS 施設で得られる RI イオンビームは核子あたり 300 MeV 程度と非常に高速な上、核子の束縛エネルギー程度(~ 8 MeV) のエネルギー広がり避けられないため、そのままではコリニアレーザー分光法を適用することは不可能である。しかし、BigRIPS 施設で開発が進められている超低速 RI イオンビーム施設(SLOWRI 施設[4])では、高効率で eV \sim 数十 keV に変換した低速 RI イオンビームが得られる。このビームを利用すれば、ISOL 法では得ることが難しい RI に対してコリニアレーザー分光を遂行することができる。

RICO プロジェクトでは短寿命 RI を対象とした分光を行うことを目的としているが、現在本プロジェクトは立ち上げ段階にある。理化学研究所仁科加速器研究センタ

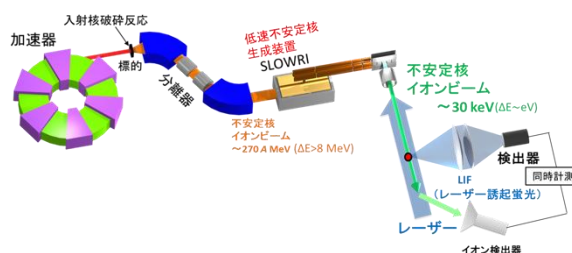


図1 コリニアレーザー分光の概要図

一に常設してあるコリニアレーザー分光装置が前回使用されたのは約 10 年前である。さらに、その当時も準安定状態にある Ar イオンを用いた試験に使用したもので、不安定核を用いたオンライン実験には至っていないことは勿論、準安定状態にいた Ar イオンの割合が未知なために、検出感度という観点では正しい意味での評価を本装置に対して行えていない状況である。そこで、まずは安定核イオンを用いたコリニアレーザー分光を行い、実験系の性能を評価し、必要があれば改良を進める必要がある。このために、一価イオンの状態でアルカリ金属原子の電子配置であるアルカリ土類金属元素の中で、イオン源を用いたイオン生成実績のある安定核イオン Ba^+ を使ったコリニアレーザー分光試験から開始することにした。

2. 研究目的

本研究では、コリニアレーザー分光法を用いた安定核イオン Ba^+ の超微細構造、同位体シフト測定実験に使用する励起レーザーとして外部共振器型半導体レーザー (ECLD) と色素レーザーを採用し、その周波数安定化を試みた。 Ba 同位体の中で 7 つが安定同位体である。 ^{138}Ba は最も天然存在比が高く約 72 % であり、次に天然存在比が高い (11 %) ^{137}Ba は核スピン I が $3/2$ であるため超微細構造の観測が可能となる。 Ba^+ は Cs 中性原子と同じ電子配置で、基底状態に $6s$ 、第一励起状態に $6p$ の準位を持ち、その間に準安定状態 $5d$ 準位があり、図 2 のようなエネルギー準位構造となっている。遷移波長が 455 nm である $6s^2S_{1/2}$ から $6p^2P_{3/2}$ への遷移を ECLD で、遷移波長が 614 nm である $5d^2D_{5/2}$ から $6p^2P_{3/2}$ への遷移を色素レーザーでそれぞれ励起させた。また、レーザーパワーに関しては観測領域内で数 mW あれば十分であるが、 614 nm 遷移に関しては準安定状態からの遷移であるため、ボルツマン分布 ($\propto g_i \exp[-\frac{\epsilon_i}{kT}]$, ただし g_i : 多重度, ϵ_i : エネルギー, k : ボルツマン定数, T : 温度) に従うと考えると、準安定状態にいる原子はイオン源後の温度を 2500 K と仮定した場合、全体の 4% 程度にとどまると推測される。このことからより強いレーザーパワーが感度の向上に必要であると考えた。

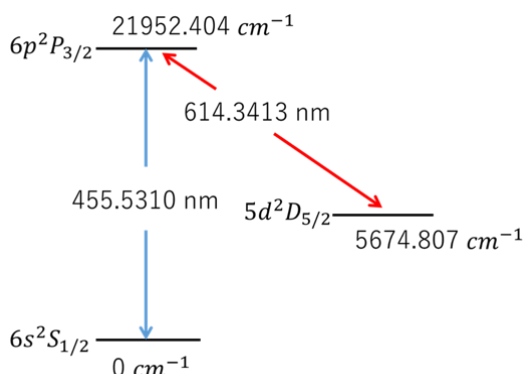


図 2 Ba^+ のエネルギー準位図
(遷移波長は真空中での値)

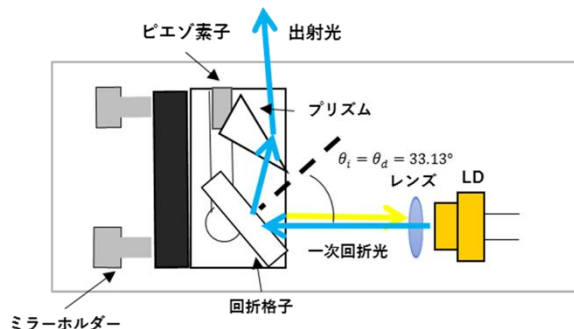


図 3 リットロー配置における
外部共振器型半導体レーザー (ECLD) の構造

3. Ba^+ 励起用外部共振器型半導体レーザー (ECLD) の開発

コリニアレーザー分光装置の性能評価実験に用いる励起レーザーとして ECLD の製作と周波数安定化を行った。通常、ファブリペロー型の半導体レーザー (LD) 単体では共振器長が非常に短くレーザー線幅が広いと、そのままで分光を行うのは難しい。しかし外部に共振器を組み ECLD にすることで、レーザー線幅が狭くなりかつ波長制御が可能になる。本研究で製作した ECLD は図 3 のようなリットロー配置で設計を行った。これは回折格子からの回折光を LD に返すことで LD チップの裏端面と回折格子の間で共振器とするものである。このとき、回折角は使用する波長と回折格子の格子定数に依存する。ECLD の発振波長は LD への注入電流と温度による内部共振器モード、外部共振器長の変化による外部共振器モードに依存する。本研究では LD への注入電流と温度をコントローラで制御し、ピエゾ素子をグレーティングマウントに設置することで外部共振器長を制御した。ピエゾ素子に流す電圧はピエゾドライバを用いて手動で調節することが可能である。しかし長時間周波数を安定させるためには、発振周波数のドリフトを防ぐために逐次制御信号をピエゾドライバに入力する必要がある。そこで図 4 に示すセットアップを用いて発振周波数の安定化を行った。

ここで使用した波長計 (HighFinesse 社 WSU-10) は、He-Ne レーザーを基準とすることで測定した周波数を設

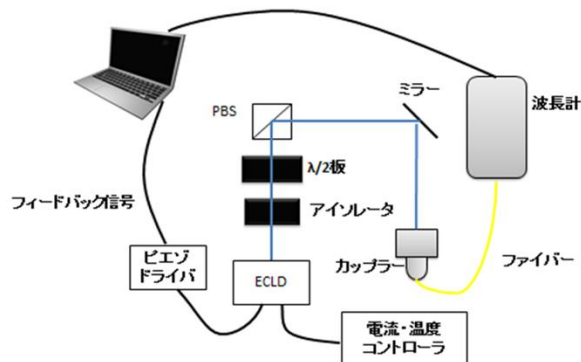


図 4 周波数安定化のためのセットアップ

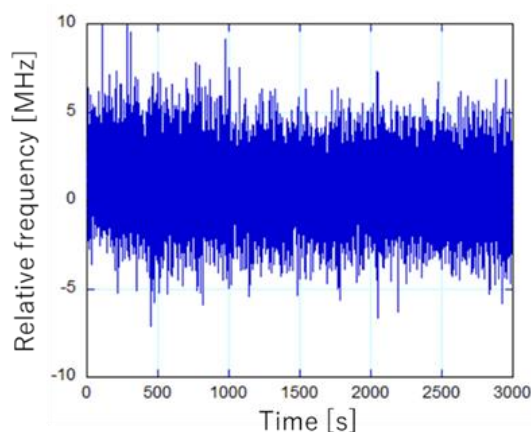


図5 ECLDの周波数安定化結果

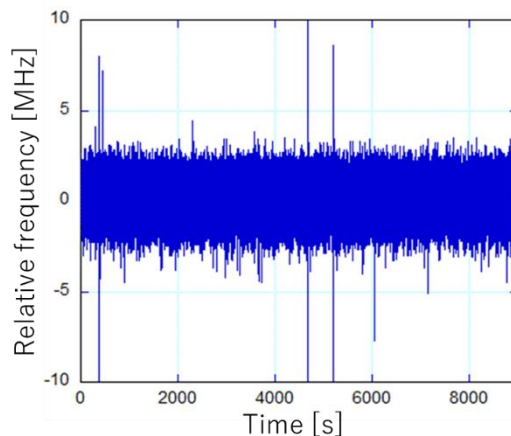


図7 色素レーザーの周波数安定化結果

定した周波数に向けてPID制御するフィードバック信号を出力する機能を持つ。この機能により出力された信号をピエゾドライバに入力し、結果ピエゾ素子の長さを制御し、共振器長を変化させることで発振周波数を安定化させた。結果を図5に示す。設定周波数に対し、FWHMで4 MHzの安定度を確認することができた。しかし、温度や振動などの外的な要因により周波数が長時間安定しない場合が多く、さらなる改良が必要である。

4. リング色素レーザーの周波数安定化

準安定状態からの遷移に対しては色素レーザー (Coherent 社 899-21 Ring Dye Laser)を用いた。このレーザーは532 nmの励起光源によって色素を励起させ、その放光をリング共振器で増幅することによって発振させるレーザーである。このレーザーは、使用する色素と共振器のミラーセットを変えることで約370 – 780 nmの波長域で発振させることが可能である。また複屈折フィルタを共振器内に導入することで、発振波長の微調整が可能となる上に、エタロンと呼ばれる干渉計を導入することで単一波長でのレーザー発振が可能となる。具体的な共振器の構造を図6に示す。本研究では約600-650 nmの発振が可能であるKiton Redと呼ばれる色素を用いて614 nmでの発振に成功した。また、この波長において図4のセットアップと同様に波長計からのPID制御信号をコントローラに入力することで、発振周波数の安定化を行った。結果を図7に示す。設定周波数に対し、FWHMで2 MHzの安定度を確認することができた。

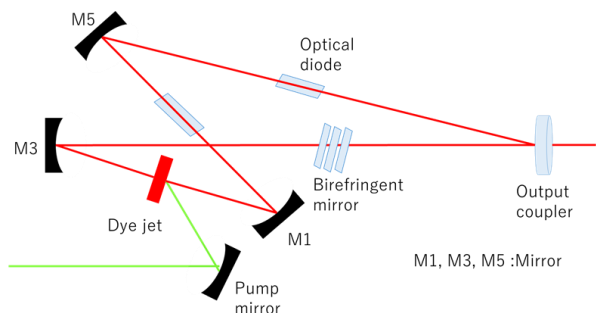


図6 使用したリング色素レーザーの構造

5. コリニアレーザー分光装置

本実験で用いたコリニアレーザー分光装置の概要図を図8に示す。表面電離イオン源で生成した Ba^+ を10から20 kVの高電圧で加速させる。ここで原理的にはイオンのエネルギー広がりには保たれたまま加速されるので、velocity bunchingと呼ばれる現象により速度幅が加速後の速さに反比例して小さくなり、分光スペクトルのドップラー幅を大幅に削減することができる。加速されたイオンは、四重極レンズで収束されながら質量分析磁石に輸送される。ビーム中に存在する複数の同位体 Ba^+ は、磁石を用いた質量分離を行うことで、目的の同位体のイオンの数を磁石下流のファラデーカップで確認し、その後観測領域へと輸送した。観測領域内にはドップラーシフト用電極を配置した。これは、観測領域内で電圧を掃引し、イオンの速度を変化させるための電極である。光のドップラー効果よりイオンの速度が変化するとそれに応じて共鳴周波数がシフトする。そのため、この電極を用いることで励起レーザーの発振周波数を変化させずに分光スペクトルを取得することが可能となる。観測領域では、イオンとレーザーの相互作用により放出されるレーザー誘起蛍光(LIF)を光電子増倍管(PMT)で検出する。この検出信号をMCSでカウントすることで分光スペクトルを取得した。 $6s^2\text{S}_{1/2} - 6p^2\text{P}_{3/2}$ 遷移に関しては励起と同じ準位間の発光を観測した一方、 $5d^2\text{D}_{5/2} - 6p^2\text{P}_{3/2}$ 遷移に関しては干渉フィルタを用いて励起レーザーの迷光

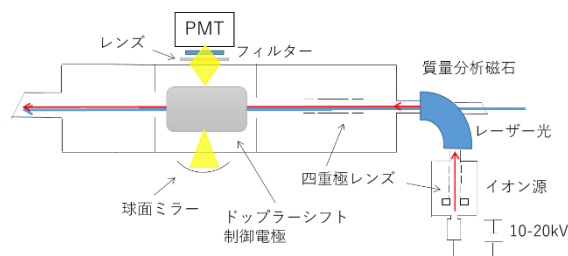


図8 コリニアレーザー分光装置概要図

を除去し $6p\ ^2P_{3/2}$ から $6s\ ^2S_{1/2}$ への発光を観測することで、より高感度に観測した。

6. 実験結果

実際に測定して得られたスペクトルを図 9, 10 に示す。核スピンの 0 でない同位体に関しては超微細構造による分離を観測できていることがわかる。これらのスペクトルを用いて超微細構造定数 A, B 、それを踏まえた同位体シフトの導出を行った。超微細構造分離間隔は、図 11 に示すように超微細構造定数 A, B の 1 次線形結合で表すことができるので、スペクトルで得た超微細構造分離間隔から A, B を導出することができた。また、超微細構造分離がある同位体に対しても A, B を求めることで、各準位の重心間のエネルギー差を求めることができ、同位

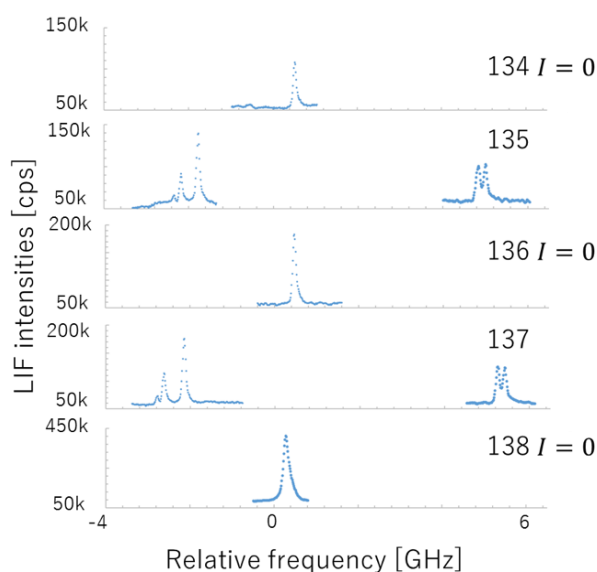


図 9 $^{134-138}\text{Ba}^+ 6s\ ^2S_{1/2} - 6p\ ^2P_{3/2}$ 共鳴スペクトル

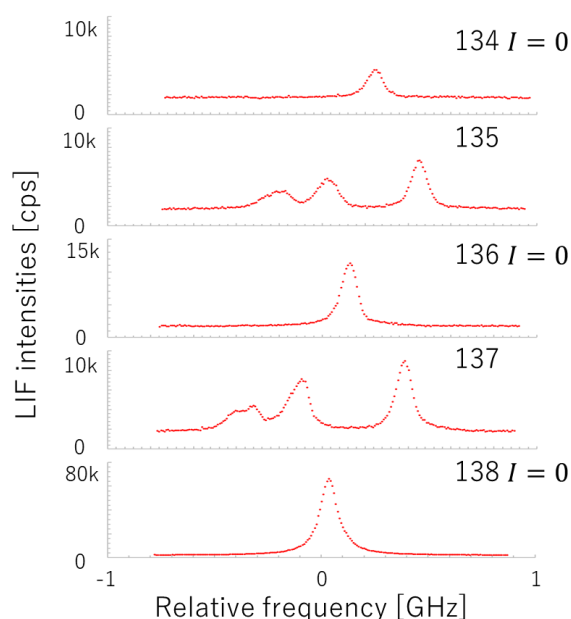


図 10 $^{134-138}\text{Ba}^+ 5d\ ^2D_{5/2} - 6p\ ^2P_{3/2}$ 共鳴スペクトル

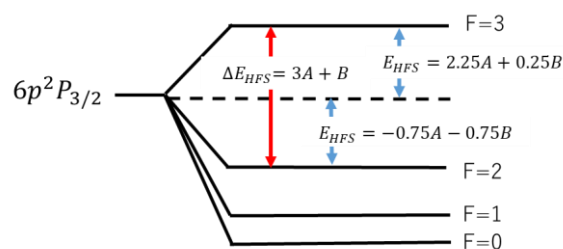


図 11 超微細構造エネルギー模式図
(核スピンの 3/2 の例)

体シフトはそれらの同位体間での差から求めた。これらの値は文献値[5]に近い値で導出することができた。

さらに測定データから、検出効率 β を蛍光スペクトルのピークカウントとイオンビーム強度の割合として求めた結果、S-P 遷移において $\beta = 3.7 \times 10^{-5}$ と導出した。

7. まとめと今後の展望

安定核イオン Ba^+ を使ったコリニアレーザー分光試験に向けて、ECLD とリング色素レーザーを用いた励起レーザーの周波数安定化に取り組んだ。結果、それぞれのレーザーにおいて FWHM 4 MHz、2 MHz の周波数安定度を達成した。その後、分光実験及び装置の評価を行った。

その結果、 $^{134-138}\text{Ba}^+$ の分光スペクトルを取得することに成功した。また、そのデータから超微細構造定数と同位体シフトを導出することができた。今後は加速器実験に向けて分光感度を上げることが課題となる。

参考文献

- 1) P. Campbell *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. **86**, 127 (2016).
- 2) R. Catherall *et al.*, J. Phys. G **44**, 094002 (2017).
- 3) T. Kubo, Nucl. Inst. Meth. B **204**, 97 (2003).
- 4) M. Wada, Nucl. Inst. Meth. B **317**, 450 (2013).
- 5) K. Wendt *et al.*, Z. für Physik A **318**, 125 (1984).